

AUKŠTATEMPERATŪRINIO GRŪDŲ DŽIOVINIMO PROCESO ANALIZĖ

Martynas GUDJURGIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: martynas.gudjurgis@stud.vdu.lt

Egidijus ZVICEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: egidijus.zvicevicius@vdu.lt

Karolis PASKAČIMAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: karolis.paskačimas@stud.vdu.lt

Santrauka

Dažnai nuimtas grūdų derlius turi per didelį drėgnumą ir yra užterštas priemaisomis bei piktžolėmis. Jeigu grūdai nėra laiku išvalomi ir ypač – išdžiovinami, jie gali pradėti kaisti ir gesti. Todėl labai svarbu kuo greičiau stabilizuoti grūdų masės biologinį aktyvumą ir paruošti juos sandėliavimui. Aukštatemperatūrinės grūdų džiovinimo technologijos yra plačiai naudojamos, siekiant sumažinti nukultų grūdų drėgnumą iki laikymui saugaus kondicinio drėgnumo. Tai įvairaus drėgnumo grūdams džiovininti tinkančios, intensyvios ir patikimos, tačiau didelių energijos sąnaudų reikalaujančios technologijos. Todėl daug dėmesio skiriama džiovinant vykstantiems šilumos-masės mainų procesams ir jų valdymui optimizuoti. Intensyviai ieškoma būdų sumažinti energijos suvartojimą ir padidinti džiovinimo greitį, bet tuo pačiu nepakenkiant bendrai grūdų kokybei ir jų maistinei vertei.

Straipsnyje pateikiama kviečių grūdų, kurių pradinis drėgnumas svyravo nuo $14,7 \pm 1,1$ proc. iki $17,2 \pm 1,3$ proc., džiovinimo periodinio veikimo šachtinėje 95 t talpos ir 60 t per valandą maksimalaus našumo džiovykloje proceso analizė. Nustatyta, kad ventiliuojant 80 °C temperatūros džiovykliu, vieno džiovinimo ciklo metu iš grūdų išgarinama vidutiniškai 2494,0±827 kg vandens. Taip pat buvo atlikta palyginamoji skirtingo pradinio drėgnumo analizė: <15 proc.; 15,1–15,5 proc.; 15,6–16 proc.; 16,1–16,5 proc.; >16,5 proc. kviečių grūdų džiovinimo procesų palyginamoji analizė nustatant džiovinimo trukmės ir džiovyklos savybių pokyčius.

Reikšminiai žodžiai: aukštatemperatūrinis džiovinimas, aušinimas, temperatūra, drėgnis, kviečiai.

Įvadas

Javai yra vieni svarbiausių žemės ūkyje auginamų augalų. Tai pagrindinis maisto medžiagų ir energijos šaltinis žmonėms, todėl jiems tenka svarbus vaidmuo aprūpinant šalies ir pasaulio gyventojus maistu. Iš jų pasaulyje yra gaunama beveik pusė kalorijų. Be to, ryžiai, kviečiai ir kukurūzai yra neatsiejami įvairių kultūrų mitybos raciono elementai. Grūdai taip pat labai svarbi gyvulių pašarų sudedamoji dalis, plačiai naudojami pramonėje, įskaitant biodegalų, kepimo aliejų ir kitų produktų gamybos sritis. Javų grūdai auginami visame pasaulyje skirtingomis klimato sąlygomis ir yra reikšmingi žmonių gerovės ir pasaulio ekonomikos palaikymui ir vystymuisi (Igrejas, Branlard, 2020).

Tuo pačiu juose vyksta aktyvūs biocheminiai procesai, palanki aplinka mikroorganizmų veiklai. Grūdus laiku neišvalius ir ypač nepašalinus perteklinės drėgmės, jie gali pradėti kaisti ir gesti. Džiovinimas yra plačiausiai naudojamas konservavimo metodas, o javų grūdams – pagrindinis jų būklės stabilizavimo ir paruošimo sandėliavimui būdas. Be to, tai populiarus grūdų ir kitų žemės ūkio produktų perdirbimo procesas, kuris dažnai yra įvadinis-paruošiamasis arba baigiamasis kitų procesų etapas. Džiovinimas daro didelę įtaką džiovinamų grūdų kokybei. Jis apima šilumos ir drėgmės mainų sąveikos derinį, kurio metu grūdų drėgmė sumažinama iki laikymui saugaus kondicinio drėgnumo: grūdavaisių (javų grūdų) – 14 proc., rapsų – 8 proc., pupų – 14 proc., kukurūzų – 13 proc. Tačiau tuo pačiu džiovinimas yra didelių energijos sąnaudų reikalaujantis procesas: daug energijos sunaudojama džiovinimui reikalingam orui pašildyti ir ventiliatoriams sukurti. Teigiama, kad džiovinimo procesui sunaudojama 2–2,5 karto daugiau energijos nei auginant grūdus (Jimoh, 2023; Berk, 2009; Pupinis, 2009).

Šiuo metu grūdų džiovinimui dažniausiai naudojamas aukštatemperatūrinis džiovinimas šachtinėse džiovyklose. Jos yra populiarios dėl savo paprastos konstrukcijos ir patikimumo, tačiau jų eksploatavimas reikalauja ypatingo dėmesio. Džiovinant vienu metu vyksta keli skirtingi procesai: drėgmės garinimas, grūdų šildymas ir vėsinimas, jų fizinių savybių pokyčiai. Tai pasireiškia grūdų sūpilo aukščio, tūrio ir aerodinaminių savybių pokyčiais, grūdų cheminės sudėties, birumo ir paviršiaus šiurkštumo svyravimais. Dėl šių veiksnių būtina nuolat stebėti ir reguliuoti džiovinimo sąlygas, siekiant didesnio džiūvimo greičio ir proceso efektyvumo, mažesnių energijos sąnaudų, geresnės grūdų kokybės ir jų maistinės vertės (Kučinskas, 2001; Novošinskas, Zvicevičius, 2000; Steponaitis, 2004).

Tyrimo tikslas – ištirti grūdų džiovinimo šachtinėje džiovykloje technologiją, įvertinant aukštatemperatūrinių džiovinimo sąlygų poveikį džiovyklos parametrų kaitai ir technologinio proceso efektyvumą.

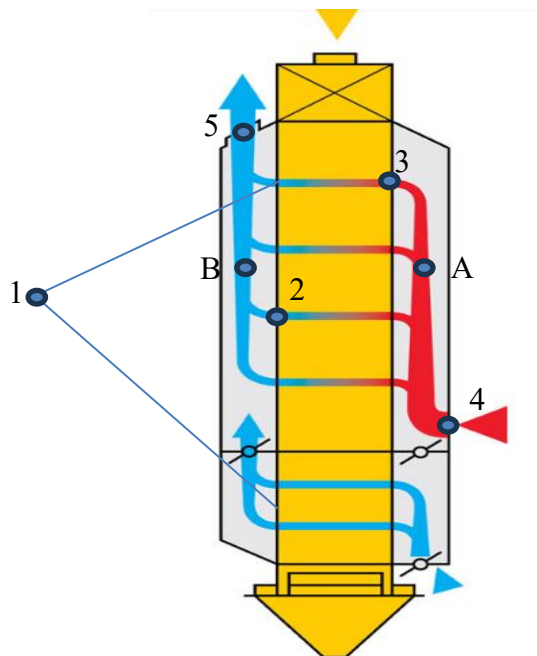
Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Atlikti grūdų džiovinimo šachtinėje džiovykloje monitoringą.
2. Nustatyti džiovyklos savybių kaitos kinetiką.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimai atlikti 2024 m. rugpjūčio 4–12 d. žemės ūkio bendrovėje, Pakruojo rajone. Tirtas aukštatemperatūrinės periodinio veikimo džiovyklos grūdų džiovinimo procesas. Grūdų džiovyklos talpa 95 t, džiovinimo šachtos aukštis 20

m, našumas $60 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$. Priešingose šachtos pusėse įrengti džioviklio tiekimo ir ištraukimo kolektoriai (žr. 1 pav.). Džioviklos ištraukimo kolektoriuje trijuose skirtinguose aukščiuose buvo sumontuoti temperatūros ir temperatūros-santykinio drėgnio matavimo jutikliai „MICROLITE III“. Jutiklių išdėstymo schema pavaizduota 1 paveiksle. Tiekiamo džioviklio temperatūra ir drėgnų bei išdžiovintų grūdų temperatūra ir drėgnis buvo fiksuojami džioviklos valdymo sistemos. Džiovinta pašildytu oru, kurio pašildymui buvo naudojamas dujinis šilumos generatorius. Drėgnam džiovikliui pašalinti ir cirkuliacijai sukurti džiovykloje įrengti du ašiniai ventilatoriai, kurių galia 55 kW. Degiklio temperatūra vidutiniškai buvo $73,86 \pm 10,86 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiekiamas oro srautas buvo apskaičiuotas anemometru, išmatavus oro įsiurbimo į džiovyklą greitį pro $12,5 \text{ m}^2$ skerspjūvio ploto angą. Nustatyta, kad tiekiamas oro srautas $L = 16,1625 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.



1 pav. Periodinio veikimo džioviklos principinė schema: A – oro tiekimo kolektorius; B – oro išmetimo kolektorius; 1 – santykinio oro drėgnių matavimo jutiklių išdėstymo pozicijos; 2 – temperatūros jutiklio įrengimo pozicija; 3 – džioviklos degiklio temperatūros jutiklis; 4 – oro įsiurbimo į džiovyklą anga ($12,5 \text{ m}^2$); 5 – džioviklio/oro ištraukimo ventilatoriai (2 vnt.)

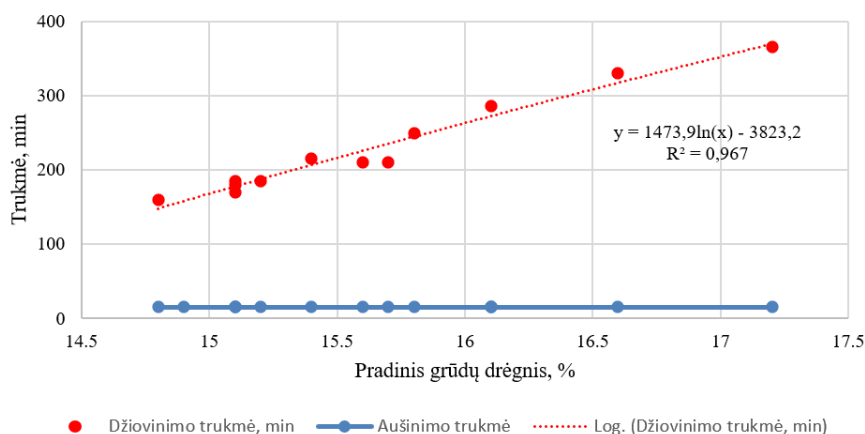
Fig. 1. Schematic diagram of a periodic dryer: A – air supply manifold; B – air exhaust manifold; 1 – positions of the relative humidity measurement sensor placement; 2 – position of temperature sensor installation; 3 – dryer burner temperature sensor; 4 – air intake opening into the dryer (12.5 m^2); 5 – dryer/air exhaust fans (2 pcs.)

Tyrimo metu džioviklos kamera buvo užpildoma kviečiais, kurių pradinis drėgnis buvo fiksuotas naudojant drėgnio matavimo prietaisą „PFEUFFER GRANOLYSER“. Džiovinimo temperatūra buvo nustatyta džioviklos valdymo sistemoje, kuri pagal integruotus jutiklius kontroliavo šildymo režimą. Be to, papildomai įrengti jutikliai leido tiksliau stebėti temperatūros ir drėgnio pokyčius tiek džiovykloje, tiek aplinkoje. Džiovinimo proceso metu buvo fiksuojami tiekiamo ir šalinamo oro parametrai 1 min. intervalu. Baigus džiovinimą, šildytuvus buvo išjungiamas, o grūdai dar 15 min. buvo ventiliuojami aplinkos oru, siekiant išlyginti temperatūrą ir drėgnį. Lygiagrečiai fiksuota aplinkos temperatūra ir santykinis drėgnis. Surinkti duomenys buvo apdorojami statistiniais metodais, apskaičiuojant absoliutinį džioviklio įtekančio ir ištekančio oro drėgnį, nustatant bendrą džiovinimo trukmę ir iš grūdų pašalintos drėgmės kiekį. Taip pat buvo įvertintas džioviklio sugeriamas drėgmės kiekis ir jo parametų kitimo kinematika skirtinguose džiovinimo proceso etapuose.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tyrimai atlikti džiovinant žieminių kviečių grūdus, kurių pradinis drėgnumas kito nuo $14,11 \pm 0,64$ proc. iki $17,2 \pm 0,64$ proc., o po džiovinimo – nuo $12,95 \pm 0,19$ proc. iki $13,34 \pm 0,19$ proc. Iš viso buvo išanalizuota 12 džioviklos darbo ciklų ir jų metu džiovinamos grūdų partijos suskirstytos į 5 intervalus pagal pradinį grūdų drėgnį: iki 15 proc., nuo 15,1 proc. iki 15,5 proc., 15,6 proc. iki 16 proc., 16,1 proc. iki 16,5 proc. ir 16,5 proc. ir daugiau. Džiovinimas, priklausomai nuo pradinio grūdų drėgnio, truko $181,00 \pm 63,07$ iki $307,14 \pm 63,07$ min. (žr. 2 pav.). Tyrimo objektu buvo periodinio veikimo džiovykla, todėl grūdų džiovinimo procesą sudarė nuosekliai besikeičiantys džiovinimo ir aušinimo etapai.

Aušinimo periodas, nepriklausomai nuo pradinio grūdų drėgnio, buvo pastovus ir truko apie 15 min. Džiovinimo periodo trukmė, didėjant pradiniam grūdų drėgniui, logaritmiškai didėjo: pradiniam grūdų drėgniui didėjant nuo $14,11 \pm 0,64$ proc. iki $17,2 \pm 0,64$ proc., džiovinimo periodo trukmė padidėjo nuo 160 min. iki 365 min.

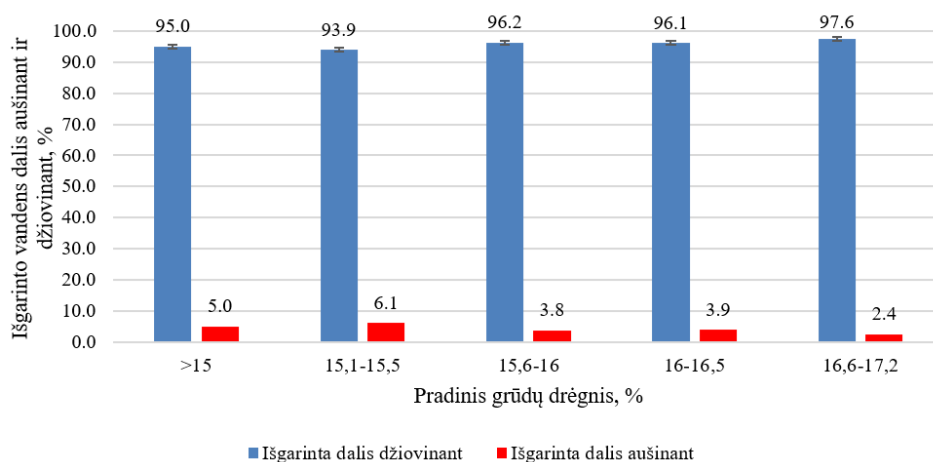


2 pav. Džiovinimo ir aušinimo trukmės priklausomybė nuo skirtingo pradinio grūdų drėgnio

Fig. 2. Dependence of drying and cooling time on different initial grain moisture content

Džiovinimo periode grūdai buvo džiovinami vidutiniškai nuo $12,95 \pm 0,19$ proc. iki $13,34 \pm 0,19$ proc. Paskaičiuota, kad džiovinimo proceso metu vidutiniškai buvo išgarinama $2494,0 \pm 827,08$ kg vandens. Aušinimo metu vidutiniškai buvo išgarinta apie $108,65 \pm 22,84$ kg vandens, o grūdai atvėsunami nuo $48 \pm 3,7$ °C iki $31 \pm 4,4$ °C.

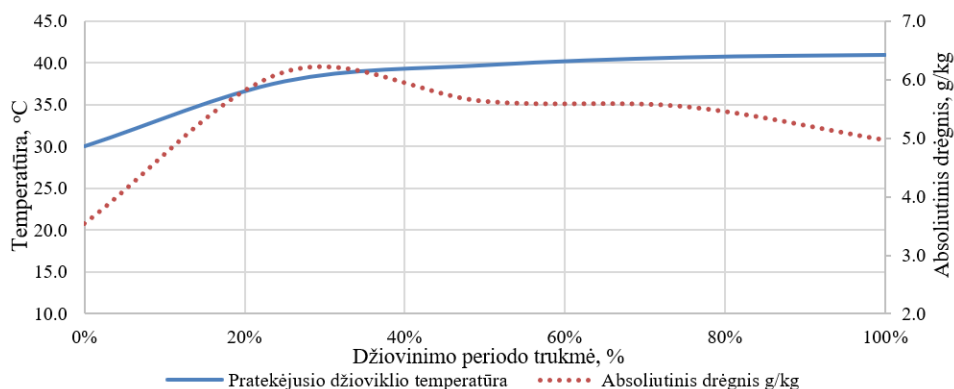
Džiovinimo metu išgarinto vandens dalis logaritmiškai didėjo, siekdama nuo 95 proc. iki 97,6 proc., priklausomai nuo pradinio drėgmės intervalo (žr. 3 pav.). Tuo tarpu aušinimo metu išgarinto vandens dalis logaritmiškai mažėjo – nuo 5,0 proc. iki 2,4 proc.



3 pav. Džiovinimo, aušinimo metu išgarinto vandens dalies priklausomybė nuo pradinio grūdų drėgnio

Fig. 3. Dependence of the fraction of water evaporated during drying and cooling on the initial grain moisture content

Per džiovinamų grūdų sluoksnį pratekėjusio džioviklio parametrai nuosekliai kito (žr. 4 pav.). Intensyviausias džioviklio temperatūros kilimas fiksuotas džiovinimo periodo pradžioje, iki 40 proc. džiovinimo periodo trukmės. Per šį laiką iš grūdų masės ištekančio džioviklio temperatūra padidėjo nuo $30 \pm 1,51$ °C iki $37,8 \pm 0,73$ °C. Tuo metu, per likusį džiovinimo periodo laiką, ištekančio džioviklio temperatūra padidėjo nuo $37,8 \pm 0,73$ °C iki $41,0 \pm 1,08$ °C.



4 pav. Iš džioviklos ištekančio džioviklio temperatūros ir absoliutinio drėgnumo kitimo dinamika

Fig. 4. Dynamics of temperature and absolute humidity changes of the desiccant leaving the dryer

Absoliutinio drėgnio intensyviausias kilimas fiksuotas tik periodo pradžioje, iki 25 proc. džiovinimo periodo trukmės. Šiame etape iš grūdų masės ištekančio džioviklio absoliutinis drėgnis padidėjo nuo $3,5 \pm 1,8$ g/kg iki $6,1 \pm 2,9$ g/kg. Likusį džiovinimo periodo laiką, iš džioviklos ištekančias absoliutinis drėgnis nuosekliai mažėjo, nuo $6,1 \pm 2,9$ g/kg iki $5 \pm 2,2$ g/kg.

Išvados

1. Nustatyta, kad pradiniam grūdų drėgniui padidėjus nuo $14,11 \pm 0,64$ proc. iki $16,67 \pm 0,64$ proc., džiovinimo trukmė padidėjo beveik 1,7 karto, nuo $181,00 \pm 63,07$ iki $307,14 \pm 63,07$ min.
2. Paskaičiuota, kad pradiniam grūdų drėgniui padidėjus nuo $14,11 \pm 0,64$ proc. iki $16,67 \pm 0,64$ proc., iš 1 t grūdų išgarinamos drėgmės kiekis kito nuo $15,9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ iki $47,6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, apytiksliai 3 kartus. Tuo tarpu aušinimo periode išgarinamos drėgmės kiekis mažėjo nuo $1,04 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ iki $0,6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.
3. Nustatyta, kad džiovinimo metu džiovikloje buvo išgarinama vidutiniškai $2494,0 \pm 827$ kg vandens. Aušinant buvo išgarinama $110 \pm 22,84$ kg vandens.
4. Didžiausias absoliutinis drėgnis buvo gautas praėjus 25 proc. džiovinimo periodo trukmės. Tuo tarpu ištekančio džioviklio temperatūra džiovinimo periodo metu nuosekliai kyla, artėdama prie ištekančio džioviklio temperatūros.

Literatūra

1. Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology*. Academic press.
2. Igrejas, G., & Branlard, G. (2020). The importance of wheat. In *Wheat quality for improving processing and human health* (pp. 1-7). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1.
3. Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I. (2023). Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*, 15(3), 548-576. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102145>.
4. Kučinskas, J. (2001). *Žemės ūkio mašinų paruošimo darbai. Šieno ir grūdų džiovinimas*. Kaunas.
5. Novošinskas, H., & Zvicevičius, E. (2000). Grain drying in variable cross-section tank. *LŽŪU mokslo darbai*, 32(3), 61-68.
6. Pupinis, G. (2009). Grūdų džiovinimas kintamu oro srautu. *Agricultural Sciences/Zemės ūkio Mokslai*, 16(1-2), 69-75.
7. Steponaitis, V. (2004). Research on periodic grain drying. *LŽŪU ŽŪI Instituto ir LŽŪ universiteto mokslo darbai*, 96-107.

HIGH-TEMPERATURE GRAIN DRYING PROCESS ANALYSIS

Abstract

Often, the harvested grain has too much moisture and is contaminated with impurities and weeds. If the grain is not cleaned and particularly dried in time, it can start to dry out and spoil. It is therefore very important to stabilize the biological activity of the grain mass as soon as possible and to prepare it for storage. High-temperature drying technologies are widely used to reduce the moisture content of beaten grain to a storage-safe moisture content. They are intensive, reliable, but energy-intensive technologies for drying grain of different moisture contents. Therefore, much attention is paid to optimizing the heat-mass exchange processes and their management during drying. Intensive research is being carried out to find ways to reduce energy consumption and increase drying speed without compromising the overall quality and nutritional value of the cereals.

This paper presents a process analysis of the drying of wheat grain with initial moisture content ranging from $14,7 \pm 1,1\%$ to $17,2 \pm 1,3\%$ in a batch dryer of 95 tonne capacity and 60 tonne/hour maximum capacity. It was found that the average evaporation of water from the grain during one drying cycle with a dryer vented at 80°C was $2494,0 \pm 827$ kg. A comparative analysis of drying processes for wheat grains with different initial moisture contents: $<15\%$; $15.1-15.5\%$; $15.6-16\%$; $16.1-16.5\%$; $>16.5\%$ was also carried out to determine changes in drying time and drying agent properties.

Keywords: high-temperature drying, cooling, temperature, moisture, wheat